



刘录三等 / 编著

生物链调控湖泊富营养化技术 ——北方浅水湖泊白洋淀

Biological Chain Techniques for Eutrophication
Remediation—A Case Study of Baiyangdian Lake

中国环境出版社

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07209-008) 资金支持

生物链调控湖泊富营养化技术

——北方浅水湖泊白洋淀

Biological Chain Techniques for Eutrophication Remediation

—A Case Study of Baiyangdian Lake

刘录三 等著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

生物链调控湖泊富营养化技术: 北方浅水湖泊白洋淀/
刘录三等著. —北京: 中国环境出版社, 2017.7

ISBN 978-7-5111-3245-1

I. ①生… II. ①刘… III. ①白洋淀—湖泊污染—富营养化—污染控制 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 148833 号

出版人 王新程
责任编辑 董蓓蓓
责任校对 尹芳
封面设计 岳帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (总编室)
010-67113412 (第二分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 7 月第 1 版
印 次 2017 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 14.25
字 数 222 千字
定 价 52.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

参 编 人 员

刘录三 刘存歧 梁淑轩

王 瑜 李 黎 王玉荣

王军静 王云晓 邢晓光

前 言

湖泊作为全球重要的生态系统类型之一，自古以来一直是人类赖以生存和发展的重要活动场所，具有保障工农业用水、提供饮用水水源、繁衍和生长水生生物、沟通航运保障运输、调节河川径流量、改善区域生态环境质量等多重功能，在国民经济社会活动中发挥着重要作用。我国更是湖泊众多，其中，在长江中下游地区分布着我国最大的淡水湖群，如洞庭湖、鄱阳湖等；在青藏高原则星罗棋布般点缀着大量的内陆咸水湖，如青海湖、纳木错湖等。人们临湖而居，生息繁衍，孕育出了璀璨的湖区文明。从历代文人墨客的吟咏中，我们就可以大致领略湖泊及周边区域在当时的生态环境和人文状况。如唐朝诗人孟浩然的“八月湖水平，涵虚混太清。气蒸云梦泽，波撼岳阳城”，生动再现了洞庭湖夏秋季节的水文情势以及水汽交换状况；宋代文豪苏轼的传世名作“水光潋滟晴方好，山色空蒙雨亦奇。欲把西湖比西子，淡妆浓抹总相宜”，形象勾勒出了西湖水色随着气象条件的不同而千变万化。

白洋淀作为北方浅水草型湖泊的典型代表，位于九河下梢，地跨河北众多县境，是大清河中游水量调节的重要枢纽，关系到保定市、河北省乃至京津冀首都圈的区域生态环境安全，战略意义重大。像我国大多数湖泊面临的困境一样，由于人类活动的过度干扰，用水量居高不下，污染排放得不到有效控制，白洋淀富营养化程度不断加剧，部分淀泊开

始由草型湖泊向藻型湖泊转变,并存在沼泽化现象,导致湖区生态系统健康受损,生态服务功能下降。鉴于此,“国家水体污染控制与治理科技重大专项”在“十一五”期间特地设置了“白洋淀草型富营养化和沼泽化逐级治理技术与工程示范课题”(2008ZX07209-008),在控源、净淀和流域管理的总体思路指导下,力图攻克白洋淀富营养化和沼泽化逐级治理系列关键技术,为北方平原干旱区草型湖泊恢复提供强有力的技术支持,服务国家和地方的重大科技需求。

本书内容主要集成了该课题中“生物链调控富营养化技术与工程示范”子课题的相关研究成果。通过分析白洋淀水生态系统的组成特征、辨识主要生物类群间的生物链和食物网关系,阐明了环境要素对水生生物链的影响以及生物链结构对营养负荷的耐受性;以营养负荷削减为主要衡量指标,构建了具有良好营养负荷削减及生物控藻功能,且自我稳定性较高的目标生物链,形成了白洋淀削盐-控藻-碎屑生物链综合调控技术,并选择典型淀泊建设示范工程,获得关键技术参数,产生示范效应。

全书共计9章。第1章为总论,分析了白洋淀富营养化防治的现实需求,介绍了国内外生物调控湖泊富营养化的研究现状及本研究总体思路,由刘录三、王瑜撰写;第2章全面介绍了白洋淀区域概况,由李黎、刘存歧撰写;第3章系统分析了白洋淀水生态系统的组成特征,由刘存歧、王瑜、王军静撰写;第4章对白洋淀富营养化状况进行了综合评价,探讨了影响富营养化的环境因子,由王瑜、梁淑轩撰写;第5章通过静态释放、扰动实验等手段,研究了白洋淀沉积物营养盐释放特征,由梁淑轩、王云晓撰写;第6章基于鱼类的食性研究,绘制了白洋淀食物网结构图,由刘录三、刘存歧、王玉荣撰写;第7章通过系统的原位围隔

试验,初步确定了用于调控白洋淀富营养化的不同生物组合以及复合生物链组合,由王瑜、李黎撰写;第8章系统介绍了白洋淀生物链调控富营养化综合示范工程,并对示范效果进行了综合评估,由刘录三、刘存歧、王瑜撰写;第9章结合现有研究成果,针对白洋淀生态环境保护思路和策略提出了若干对策建议,并对今后开展相关科研工作进行了展望,由刘录三撰写;附录由刘录三、刘存歧、王瑜、李黎、邢晓光撰写。全书由刘录三统稿。

本研究前期思路设计、示范工程建设、成果凝练等关键环节,均得到了课题负责人舒俭民研究员的亲自指导,在此表示特别感谢。在执行期间,也得到了课题组其他任务负责人崔保山教授、王靖飞研究员、李晓文教授、白军红教授、何萍研究员、何连生高工等人的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

在本书撰写过程中,作者力求结合白洋淀生态环境和社会经济实际情况,做到科学性和实用性有机统一。由于浅水湖泊水生态修复涉及内容广泛,多学科交叉,在现场试验、工程示范等环节不可控制的因素较多,特别是生物链调控富营养化研究尚未形成成熟的科学体系,加之作者水平和能力有限,书中出现疏漏和不足之处在所难免,衷心期望广大读者不吝批评指正。

刘录三

2017年1月5日

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 生物调控白洋淀富营养化的需求分析	1
1.2 国内外湖泊富营养化研究现状及调控技术	2
1.3 研究内容及技术路线	8
第 2 章 白洋淀区域概况	13
2.1 地理位置	13
2.2 地形地貌	15
2.3 水文情况	15
2.4 气候条件	16
2.5 土壤	16
2.6 生物资源	17
2.7 社会经济情况	18
第 3 章 白洋淀水生态系统组成特征	19
3.1 白洋淀理化因子特征	19
3.2 白洋淀浮游植物群落特征	30
3.3 白洋淀浮游动物群落特征	36
3.4 白洋淀大型底栖动物群落特征	50
第 4 章 白洋淀富营养化评价与影响因子分析	55
4.1 白洋淀富营养化评价	55

4.2	白洋淀水体铁含量对富营养化的影响.....	63
4.3	白洋淀水体叶绿素 a 含量与其他水质因子的关系.....	72
第 5 章	白洋淀沉积物营养盐释放特征研究.....	79
5.1	白洋淀沉积物理化特征.....	79
5.2	白洋淀沉积物对氨氮的吸附释放特征研究.....	88
5.3	白洋淀沉积物对磷的吸附释放特征研究.....	94
5.4	静态释放.....	102
5.5	扰动试验.....	105
5.6	水草衰亡氮、磷释放试验.....	108
第 6 章	基于鱼类食性的白洋淀食物网研究.....	111
6.1	调查及分析方法.....	111
6.2	白洋淀现存鱼类.....	112
6.3	鱼类食物组成与食物类型.....	118
6.4	白洋淀鱼类营养级.....	120
6.5	白洋淀鱼类食物网.....	121
6.6	白洋淀鱼类食物网退化原因分析.....	123
第 7 章	生物链调控白洋淀富营养化的原位围隔试验.....	125
7.1	穗花狐尾藻和金鱼藻对白洋淀水质的影响.....	125
7.2	不同生物组合对白洋淀水质的影响.....	135
7.3	复合生物链组合对白洋淀水质的影响.....	143
第 8 章	生物链调控富营养化综合示范工程研究.....	152
8.1	综合示范工程区地点选择与概况.....	152
8.2	综合示范工程区生物链的构建.....	153
8.3	2011 年综合示范工程区和对照区水质分析.....	154
8.4	2012 年综合示范工程区和对照区水质分析.....	164
8.5	经济效益分析.....	167

8.6 小结	167
第 9 章 结论与展望	169
9.1 结论	169
9.2 湖泊富营养化防治展望	171
9.3 白洋淀鱼类资源养护建议	171
9.4 白洋淀生态环境保护建议	173
参考文献	175
附录 1 白洋淀浮游植物种名录及出现季节	193
附录 2 白洋淀浮游动物种名录及出现季节	199
附录 3 白洋淀底栖生物种名录	204
附录 4 白洋淀鱼类种名录	205
附录 5 白洋淀示范工程相关图片	206

第 1 章 总 论

1.1 生物调控白洋淀富营养化的需求分析

1.1.1 白洋淀的区域战略地位

白洋淀作为北方草型湖泊的典型代表，地跨河北众多县境，位于九河下梢，距保定市 45 km，距京、津各 140 km，区位敏感，同时肩负着 800 km² 耕地的除涝使命，对区域生态安全具有非常重要的战略意义。经过长期的发展演替，河北平原地区的 16 个大型洼淀已完全干涸，特殊的地理条件使白洋淀成为华北地区唯一的大型平原湖泊湿地。对于调节华北地区生态环境，改善区域温湿状况，补充地下水源，调节小气候，维持河北、北京地区生态平衡，保护生物多样性和珍稀物种资源均具有极其重要的作用。白洋淀所在区域也是南水北调中线的主要受水区之一，在华北水资源保护中具有重要的战略地位。

白洋淀的水生态与水环境问题关系到保定市、河北省乃至京津首都圈的区域生态环境安全，是全国水生态环境保护的一个“晴雨表”。自白洋淀地区水环境与水生态问题出现之日起，当地人民群众就呼吁政府尽快解决白洋淀污染问题，维护其生态功能，保证人民正常的生产、生活条件；保定市人民政府、河北省人民政府，乃至中央政府对白洋淀的保护工作一刻也没停息，并围绕白洋淀流域污染综合防治做了大量有益的工作，缓解了白洋淀的生态压力。

随着对白洋淀水生态系统重要性的认识，其功能定位重点已由 20 世纪 80 年代的“鱼苇生产、防洪滞沥、农田灌溉、水运交通、旅行游览的水产基地”，扩展并提升到“区域社会经济可持续发展的水资源、水环境支撑；生物多样性保护、防洪滞沥及区域水生态系统健康维护；华北平原和首都圈区域生态安全保障体系

重要的一环”，显著突出了白洋淀所具有的区域生态战略意义。

1.1.2 白洋淀的富营养化问题

白洋淀通过水生态系统内部独特的生态过程，发挥着调蓄洪水、控制污染、维护生物多样性、提供生物生产力等生态、环境和生产功能。但是，随着肆意排放的污染物和难以控制的面源污染进入湖泊，湖泊富营养化程度不断加剧，直接影响到湖泊生态服务功能的发挥，甚至影响到区域生态环境质量。白洋淀淀区有 39 个纯水村，周边地区有 84 个半水村，总人口 26.4 万，他们从事的水产养殖、农田种植等经济活动带来的富含氮、磷等营养物质的污染物以及他们生活中的污水、排泄物等大量直接或间接排入淀区，造成淀区氮、磷等严重超标。2003 年的调查结果表明白洋淀的污染以有机物为主，高锰酸盐指数、TN、TP 等严重超标，处于轻度富营养化状态。

1.2 国内外湖泊富营养化研究现状及调控技术

1.2.1 湖泊富营养化现状

20 世纪中期，富营养化率先成为欧洲、北美等发达地区湖泊和水库所面临的最主要污染问题。此后，富营养化开始迅速扩展到全球范围，有调查显示：亚洲有 54% 的湖泊富营养化、欧洲达到 53%、北美洲达到 48%、南美洲达到 41%，而在非洲也达到了 28%。例如，作为日本第二大湖泊的霞浦湖因其巨大的可利用水资源，曾在灌溉、生活、工业、内陆渔业和休闲等方面发挥着极为重要的作用。但早在 1900 年初期，霞浦湖的富营养化已达相当程度，该湖曾经是著名的旅游景点，因水污染加剧而于 1973 年被迫关闭。在巴西圣保罗州，由于藻类水华和水生大型植物的滋长，以及水体娱乐功能的丧失，地产的价格贬值幅度高达 50%。

我国湖泊类型众多、分布广泛，据统计，全国共有 1 km² 以上的湖泊 2 759 个，总面积达 91 019 km²，占国土面积的 0.95%，其中约 1/3 为淡水湖泊，且主要分布在东部沿海与长江中下游地区。近年来随着经济的高速发展和不适当的湖泊资源开发利用，以及农业面源污染加剧，导致湖泊富营养化问题已十分严重：这些湖泊中多数已经发生富营养化或正处在向富营养化状态发展进程中，湖泊生态

系统结构和功能持续退化,蓝藻水华频繁暴发,水质性缺水日趋加剧,严重影响湖区人民的生产生活与饮用水安全,制约了区域社会经济的可持续发展,造成了巨大的经济损失与社会问题。2007年5月,太湖蓝藻集中暴发,导致无锡部分地区饮用水水源地受到严重污染,自来水发臭无法饮用,市民纷纷抢购纯净水。太湖流域的水资源污染问题再一次给我们敲响了警钟。根据环境保护部2008年的中国环境状况公报:在监测营养状态的26个湖库中,重度富营养化的有1个,占3.8%;中度富营养化的有5个,占19.2%;轻度富营养化的有6个,占23.0%。因此,我国湖泊已经普遍面临富营养化问题且形势严峻,湖泊富营养化问题已成为我国最重要的水环境问题之一。

1.2.2 湖泊富营养化的发生及危害机理

湖泊富营养化的发生包含一系列生物、化学和物理变化的过程,其作用机制与演变过程十分复杂,学术界对湖泊富营养化的形成机理也存在多种解释,目前普遍为人们所接受的是生命周期理论。该理论认为,水体中氮、磷过量,引起藻类和浮游植物大量繁殖,水中溶解氧急剧下降,透明度降低,浮游生物、鱼类等因缺氧而大量死亡,其尸体腐烂又加重水质污染和恶化。由此来看,氮、磷的过量排放是造成富营养化的根本原因。此外,适宜的光照和温度、大气沉积作用、水体pH、CO₂含量、缓慢的水流流态等,也容易造成湖泊富营养化的频繁发生。

湖泊富营养化的危害极大,通过降低湖泊生物多样性,破坏水生生态系统的结构,严重削弱湖泊生态系统的服务功能,进而危害人类健康,制约区域社会经济的可持续发展。首先,大量浮游植物或者浅水根生植物的分解消耗大量溶解氧,释放大量溶解性有机物,加之藻类在代谢死亡过程中释放各种藻毒素,导致水质急剧恶化,严重危及湖泊饮用水水源地安全,而且一些藻类释放的微囊藻毒素还会通过生物积累与放大,逐步在鱼类和湖泊其他水产品体内富集,通过食物链进入人体,对人类健康构成严重威胁。其次,大量浮游植物和藻类的生长繁殖,使水体色度增加、水质浑浊、溶解氧量下降,导致鱼类种类数量减少、渔业减产、阻塞航道,水体经济价值大大降低,并可能导致湖泊沼泽化。最后,富营养化湖泊中耐污藻类的大量繁殖,导致水体生境条件变化巨大,使具有经济价值和观赏价值的水生高等植物、底栖生物和鱼类种群显著减少甚至消亡,引起湖泊的生物多样性下降和生态系统退化,进而引起水质和湖泊生态功能的退化。

1.2.3 生物方法调控治理湖泊富营养化

调控湖泊富营养化的根本是要解决水体的氮、磷等营养盐含量过高的问题，通常可采取以下措施：首先，对湖泊的外源污染进行控制，主要任务是控制排入湖泊中的污染物浓度，减少或截断外部输入的营养物质；其次，对湖泊内源污染的治理。

内源污染治理的方法，主要有物理方法、化学方法和生物方法等。物理方法包括机械除藻、底泥疏浚、人工曝气等，既不会带来污染物也不会导致生物入侵，相对较为安全，但也普遍存在能耗较大、运行成本高等缺点。化学方法包括添加化学药剂杀藻和凝聚沉降等。使用化学药剂杀藻收效快，但持续时间短且易造成二次污染，可能会给生态环境带来负面影响，所以只作为一种应急措施使用。生物方法是指利用生物的生理生化作用及食物链的传递过程，使湖泊中的污染物与过量营养盐得到降解和转化，从而达到水体净化的目的。生物净化技术具有经济方便、能耗低的优点，且收效显著、环保效益好，因此越来越受到人们的重视。目前，用于修复水体富营养化的生物方法主要有种植水生维管束植物、微生物净化技术、生物浮床技术、生物链调控技术等，以下对具有广泛应用前景的几种生物方法进行介绍与评估。

1.2.3.1 种植水生维管束植物

种植水生维管束植物，特别是一些具有良好吸盐抑藻效应、便于收获、具有一定营养价值、可以用作饲料或具有其他经济价值的水生植物，可以通过对营养元素的吸收利用及自身代谢活动有效降低湖泊中氮、磷水平，从而增加水生植物生长区透明度、提高底栖动物和大型浮游动物的生物量。从生态位来看，水生维管束植物和浮游藻类在营养物质的利用上是竞争关系，在吸收水体和沉积物中营养盐的同时可有效抑制浮游藻类的生长，因而能够有效缓解湖泊富营养化程度。以挺水植物中广泛使用的香蒲为例，每公顷香蒲每年可吸收氮 2 630 kg、磷 403 kg、钾 4 570 kg。此外，种植水生维管束植物，可为降解微生物提供良好的栖息场所，有利于微生物的生存。水生植物庞大的根系为细菌提供了多样化的生境，为微生物的好氧呼吸提供了有利条件。方东等（2001）在治理南京玄武湖富营养化过程中，通过种植珠草、叶绿藻、狐尾草及黑轮藻等大型沉水植物，使玄武湖实现了

从藻型浊水到草型清水的转化,目前,玄武湖生态工程区的水域从高度富营养化过渡到了中度富营养化。

在选择种植的种群时,由于植物种类不同,不同植物体内氮、磷浓度差异显著,因而对营养盐的吸收效果也存在显著差异。陈秋夏等(2008)研究表明,植物单株对氮的吸收累积量与单株生物量呈正相关,单株对磷的吸收累积量同时受到植株磷浓度和植株生物量的影响。因此,在选择植物时,要把植物生物量与植株氮、磷浓度作为重要因子,同时结合种植种群的耐污能力、季节生长特征,选择冬春和夏秋两类不同功能群的植物,合理配置植物种类,增加植物群落稳定性与净化能力。综上考虑,芦苇、美人蕉、狐尾藻、金鱼藻、水葫芦、马来眼子菜、菖蒲、细叶莎草等对氮、磷具有较强的吸附能力,适应性广,生物量大,季节间稳定性高,又具有较高的观赏价值,建议在治理湖泊富营养化的过程中,根据不同的气候条件及富营养化程度进行大面积选栽种植。

由于种植水生维管束植物具有成本低、能耗小、适用性广、管理简单、处理效果好等特点,近两年在治理湖泊富营养化中取得了很大进展。但同时需要考虑种植种群对地理环境的适应、生物入侵等情况的影响,对一些繁殖快、蔓延迅速的物种要进行适时打捞、定期收割、控制生长,防止其过度繁殖造成环境二次污染。

1.2.3.2 微生物净化技术

微生物是自然界中个体最小、数量最大、分布最广、种类最多的生物类群,因其本身所具有的降解能力在水质净化中起重要作用。作为湖泊生态系统中不可或缺的分解者,微生物通过厌氧与好氧处理对污水进行净化。厌氧处理是指在封闭的无氧处理池中,厌氧细菌把有机物分解成 CO_2 等气体,生成物还可作为很好的燃料和肥料;而好氧处理则是指在有氧条件下,好氧细菌同化或分解污水中的有机物,一部分转化成为细菌的自身物质,一部分彻底分解为 CO_2 、 NH_3 、磷等无机物,最终达到污水净化的目的。微生物在富营养化水体的净化和生态恢复的过程中起着积极的作用。此外,微生物还可以作为浮游动物的食物,有利于稳定水体中的浮游动物食物网,进而维持整个湖泊生态系统的稳定。

刘青和袁观洁(2008)采用微生物净水剂实施了武汉市青菱河修复工程。结果显示,微生物净化技术具有见效快、周期短的特点,能有效增强水体净化能力,水体透明度与叶绿素a含量得到明显改善,水体中总氮、总磷等水质指标均达到

了国家地表水Ⅳ类标准。在实际应用中,目前常用的微生物有固定化光合细菌、固定化氮循环细菌、EM制剂等。需要指出的是,微生物净化过程复杂,首先要对上万种菌株进行筛选,在不同湖泊要因地制宜地选配菌种、确定投加量;其次要搞清所加微生物菌剂之间的关系及代谢途径,避免菌剂间产生抑制与竞争。另外,微生物的修复过程是一种生命活动,其代谢活性容易受到温度、溶解氧、底泥浓度、酸碱性等环境条件变化的影响。因此,微生物净化技术在自然条件下的有效性和适应性还有待进一步考证,在实际应用中还存在一定的局限。

1.2.3.3 生物浮床技术

生物浮床技术,是按照自然规律,运用无土栽培技术原理,综合利用现代农艺和生态工程措施,在以富营养化为主体的污染水域水面种植粮食、蔬菜、花卉或绿色植物等各种适宜的陆生植物,通过植物根部的吸收、吸附作用,分解、转化、富集、浓缩水体中的氮、磷等营养物,从而使水体得到净化。在实际操作中,应当选择具有容易栽培、生长速率快、经济价值高、适应水质现状等特点的陆生植物。

钱明浩(1997)采用水面栽培陆生植物——多花黑麦草修复浸出油厂外排废水 COD_{Cr} 的去除率达到91.3%,同时创造出适宜多种生物生息繁衍的环境条件,在有限区域重建并恢复水生态系统。这种技术在我国许多河流、湖泊都已经得到验证与应用,如北京永定河引渠罗道庄河道、杭州南应加河河道、上海华槽杨树湾河道、无锡五里湖工程、上海七宝宝华小区河道、上海青浦区府前河道等。生物浮床技术比较适用于小而浅的、相对封闭的湖泊系统,这样不仅治理所需资金少,而且由于本身具有适当的遮蔽、涡流、饵料等特点,构成了野生生物栖息的良好环境,对种植在浮床上的植物进行合理的季节搭配、种属搭配、景观搭配,能提高其对重金属和氮、磷等营养物的吸收、富集效果,在收获农副产品、美化水域景观的同时,取得良好的治理效果。

1.2.3.4 生物链调控技术

在湖泊生态系统中,藻类、水生植物、浮游动物、底栖软体动物、鱼类等分别作为不同食物链中的一环,通过捕食、竞争等关系制约着各种生物的生物量,进而影响水体中氮、磷等营养盐的吸收与转化,因此可以通过调控食物链来达到

改善湖泊水质的目的（图 1.1）。传统上最具代表性的有经典生物操纵理论与非经典生物操纵理论。经典生物操纵理论，是指通过调控生物链，增加肉食性鱼类与减少滤食性鱼类来调节浮游动物的结构和种群数量，促进滤食效率高的植食性大型浮游动物快速发展，进而降低藻类生物量、提高水体透明度、改善水质。非经典生物操纵理论是指通过控制凶猛鱼类及放养滤食性鱼类来直接控制藻类的生物操纵方法。经典的生物操纵在营养盐富集不多（总磷 0.05~0.15 mg/L）、藻类由小型种类组成的湖泊中最为有效，但是对于一些富营养化程度高，尤其是蓝藻水华暴发的湖泊，因为高浓度和大个体的蓝藻会抑制浮游动物的取食，经典生物操纵的应用就受到了限制。非经典生物操纵通过调节滤食性鱼类（如鲢和鳙）的数量直接控制蓝藻，有效控制 and 缓解了水体富营养化的进程，对水质的恢复起到了积极的促进作用。

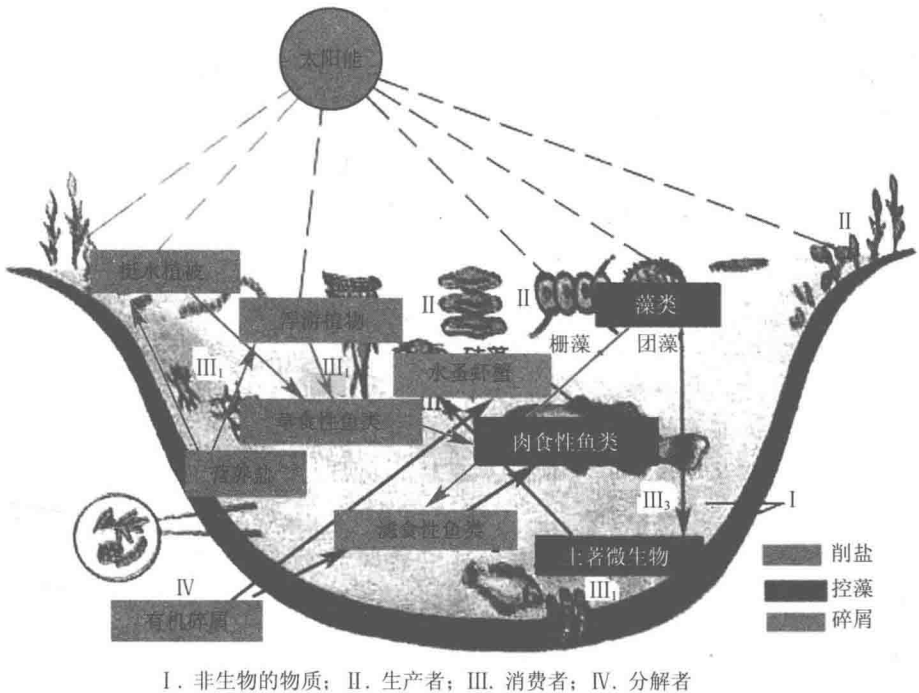


图 1.1 湖泊生态系统组分示意

李琪等（1993）在山东东周水库进行的鲢围隔实验表明，鲢对铜绿微囊藻水